

In ständiger Bewegung
Bahnbestimmung im Zeitalter der Space Geodesy

Adrian Jäggi



Bahnspur des sonj. Erdtrabanten

Sternbild: Ursa Major

Aufnahme: Schulsternwarte Rodewisch/WgH.
13. Okt. 1957 4⁵¹ h MEZ

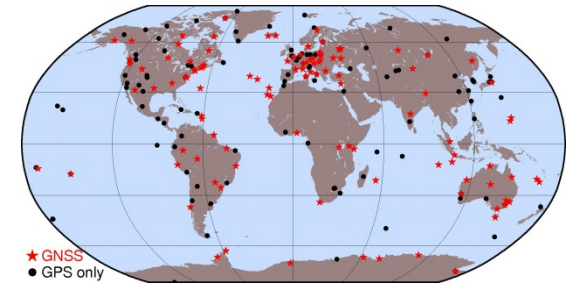


Moderne Satellitenbeobachtungsverfahren



GNSS
Global
Navigation
Satellite
System

GPS
GLONASS
Galileo
Compass



SLR
Satellite
Laser
Ranging



Observatorium Zimmerwald bei Bern, Schweiz

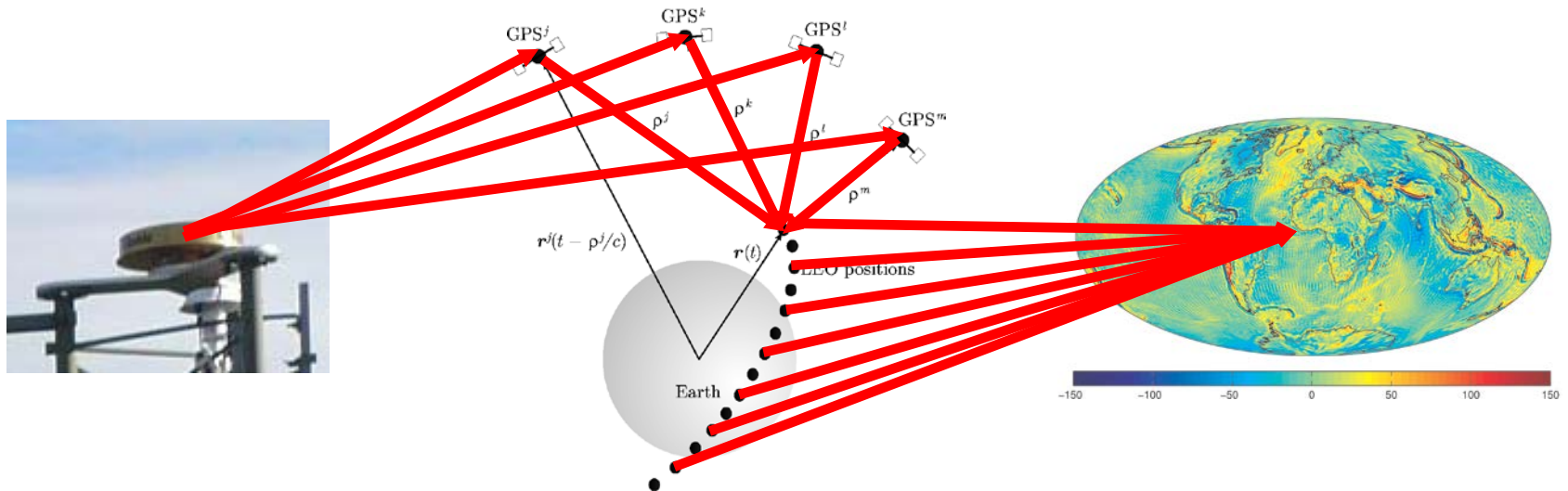
Moderne Satellitenbeobachtungsverfahren benötigen eine aufwändige und zum Teil teure **Infrastruktur**. Idealerweise sind mehrere geodätische Raumverfahren an einem Standort vereint (**Kolokation** der verschiedenen Techniken). Eine einzelne Station ist „nutzlos“, es braucht ein globales Netz von Stationen.

Der lange Weg zum wissenschaftlichen Produkt

Originale
Messungen

Zwischenprodukte,
zusätzliche Messungen

Finales
Produkt

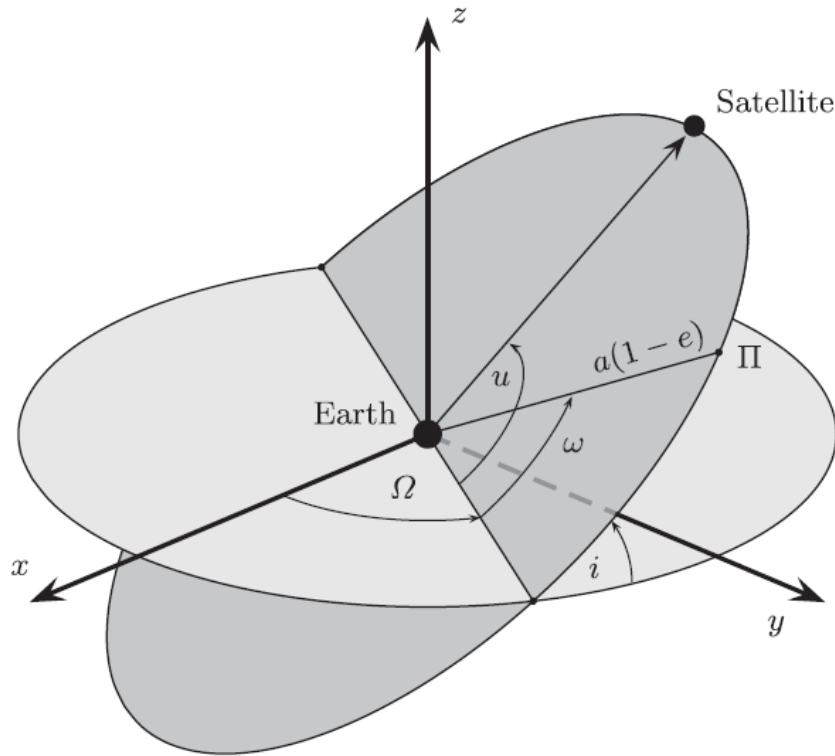


Gravitationsfeldmodelle der Erde sind bloss ein **Beispiel** für ein wissenschaftliches Produkt aus Messungen der geodätischen Satellitenverfahren. Im Rahmen des diesjährigen Erdmessungsforum dient es als immer wiederkehrendes Beispiel.



Grundlagen der Bahnbestimmung

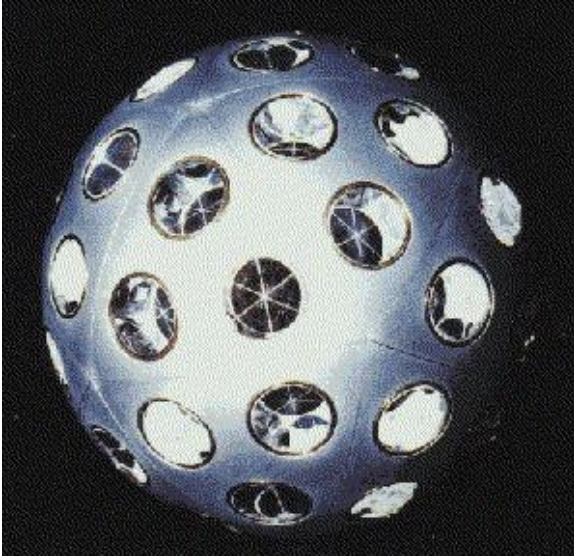
Bahnparametrisierung: **Oskulierende Bahnelemente** zum Zeitpunkt t_0



- a : grosse Bahnhalbachse
- e : numerische Exzentrizität
- i : Bahnneigung
- Ω : Rektaszension des aufsteigenden Knotens
- ω : Perigäumsargument
- u_0 : Argument der Breite zum Zeitpunkt t_0

Bahnparametrisierung: **Zusätzliche, unbekannte Parameter des Kräftefelds**

Starlette, Stella, Ajisai



Starlette

Höhe: 850 km
Inklination: 50°



Stella

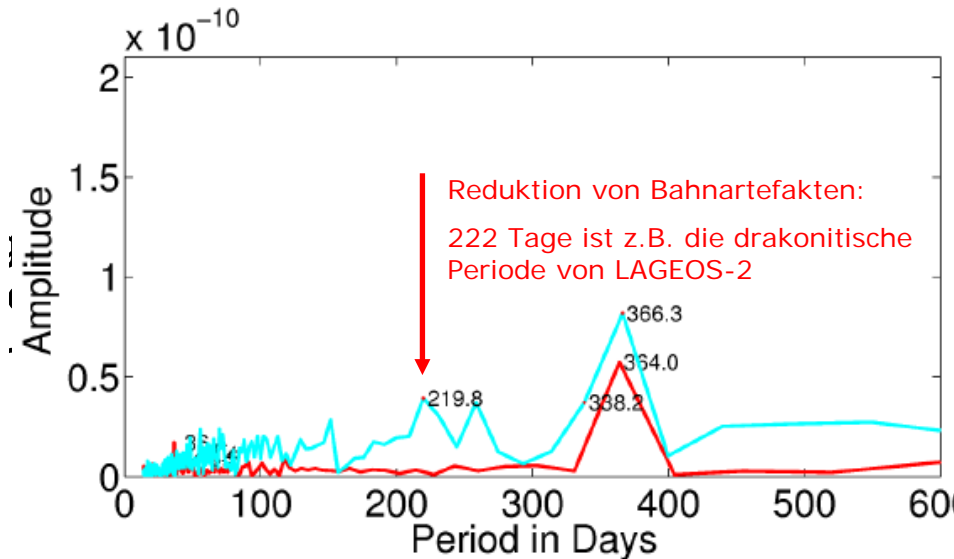
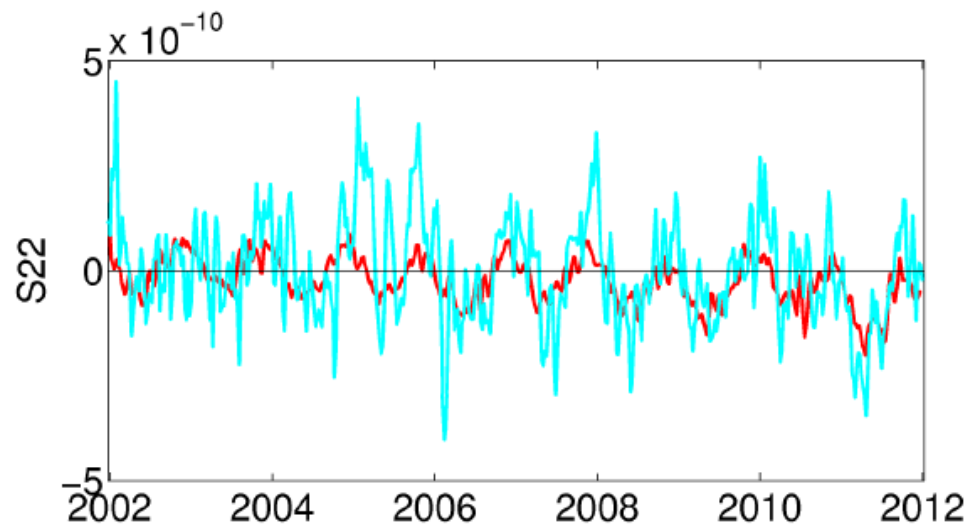
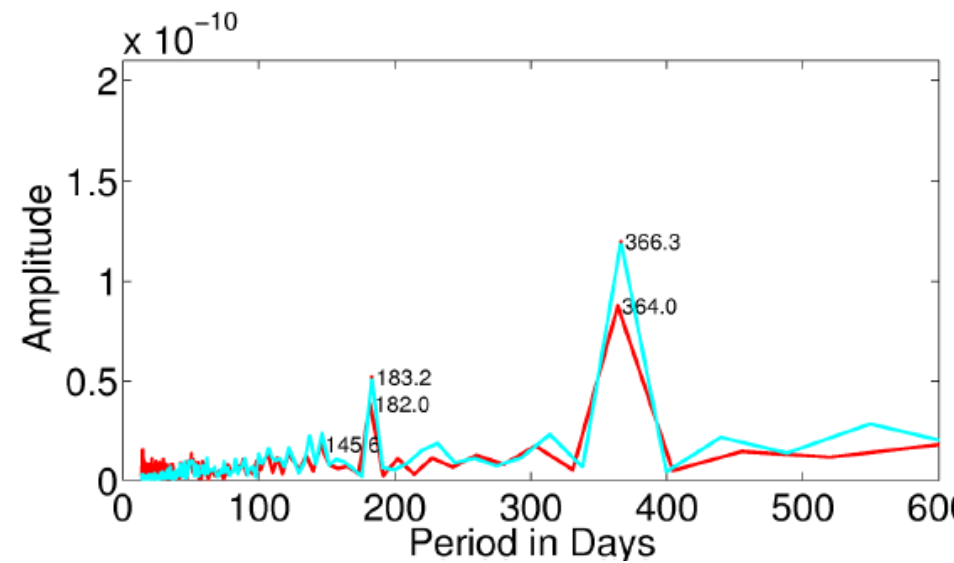
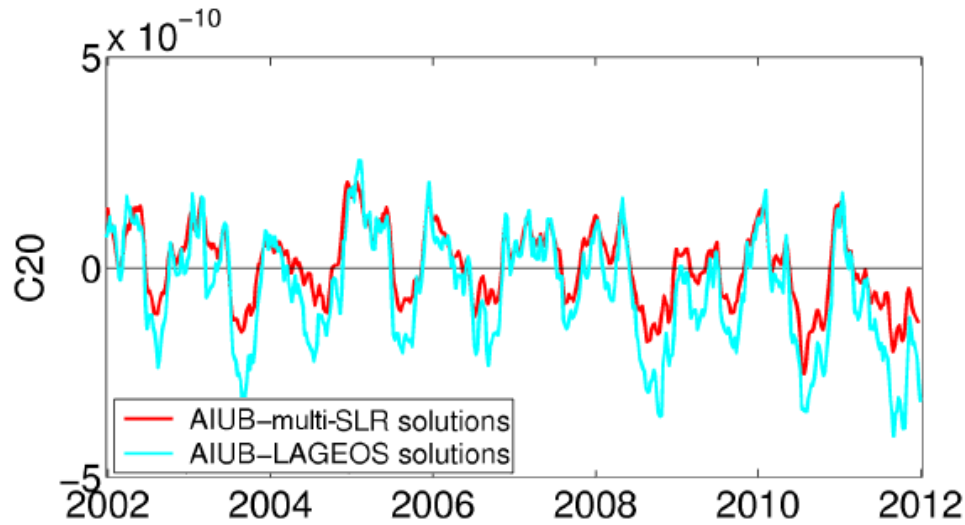
Höhe: 850 km
Inklination: 99°



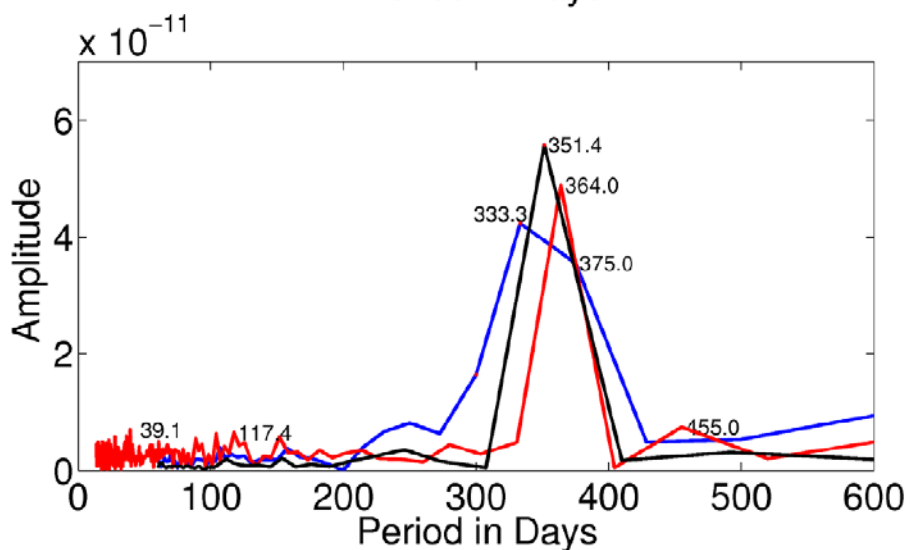
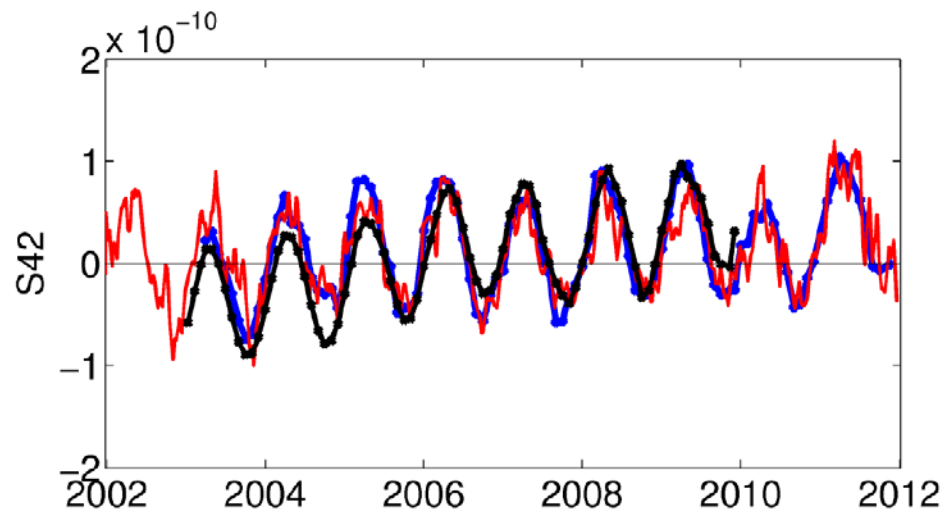
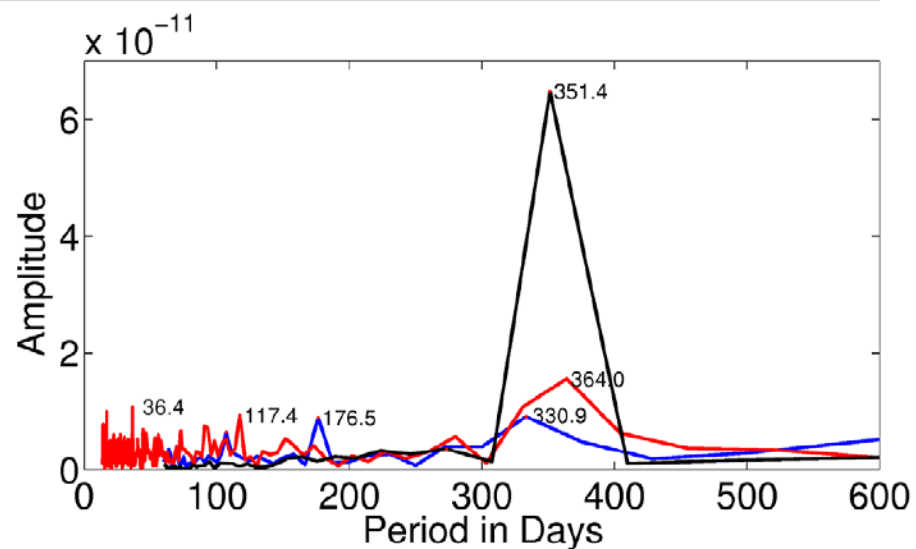
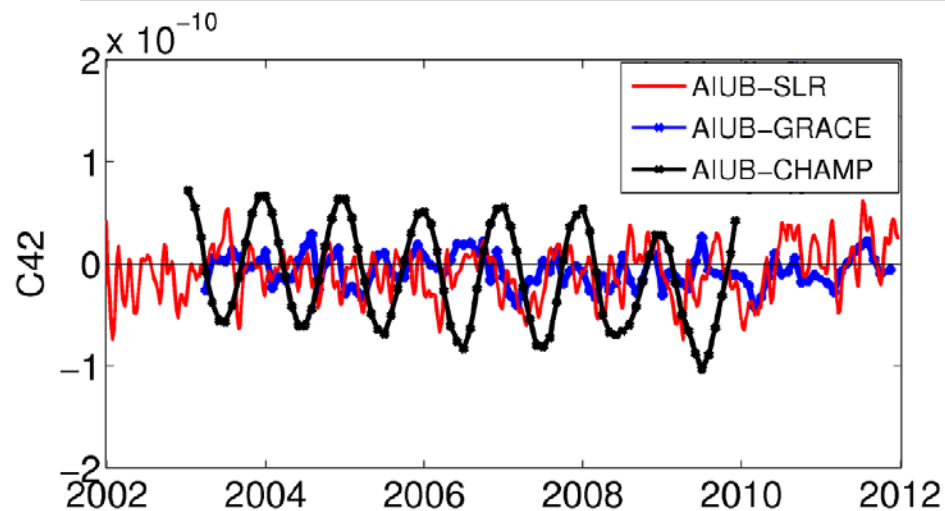
Ajisai

Höhe: 1485km
Inklination: 50°

LAGEOS-only vs. multi-SLR Lösungen



Zeitvariabilität aus multi-SLR Lösungen

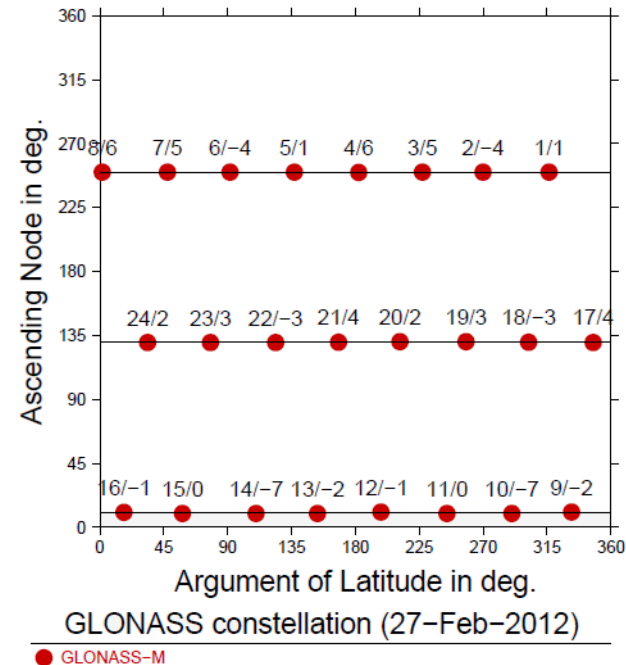
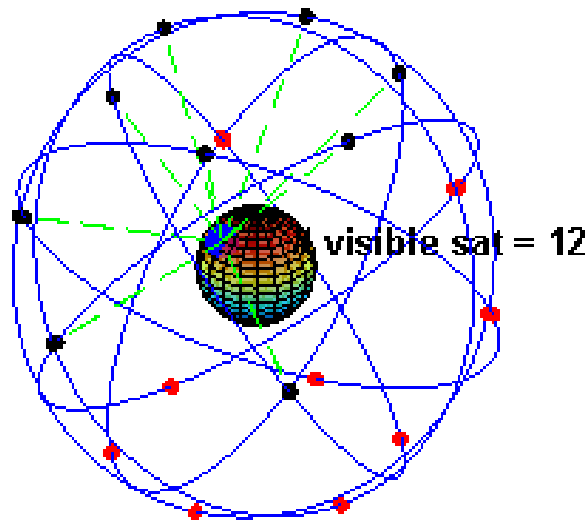


Simultane Bestimmung aller Parameter

Solution type		X pole [μs]		Y pole [μs]		LoD [μs]		Repeatability [mm]		
		bias	WRMS	bias	WRMS	bias	WRMS	Up	North	East
LAGEOS-1/2	gravity up to 4/4	4.1	160.0	-8.0	155.2	6.1	57.0	11.1	10.2	12.3
LAGEOS-1/2	no gravity	45.8	168.5	-54.1	153.5	77.3	120.5	10.9	10.0	12.4
SLR-LEO	gravity up to 4/4	38.3	267.9	-7.8	217.6	-38.5	105.6	15.3	15.4	15.2
SLR-LEO	no gravity	190.1	437.5	-61.1	315.9	189.6	359.3	15.8	15.6	16.8
multi-SLR	gravity up to 4/4	6.4	148.9	8.5	140.3	6.3	56.3	11.3	11.2	11.7
multi-SLR	no gravity	83.7	153.1	63.3	156.7	75.8	121.7	11.1	11.3	11.8

Im Sinne der **gemeinsamen Bestimmung von Geometrie und Schwere** sollten die SH Koeffizienten nicht nur im Rahmen einer dynamischen Bahnbestimmung zusammen mit den übrigen Bahnparametern bestimmt werden, sondern auch **in einem Guss zusammen mit allen anderen Parametern**. Die Tabelle zeigt, dass insbesondere auch die Erdrotationsparameter davon profitieren.

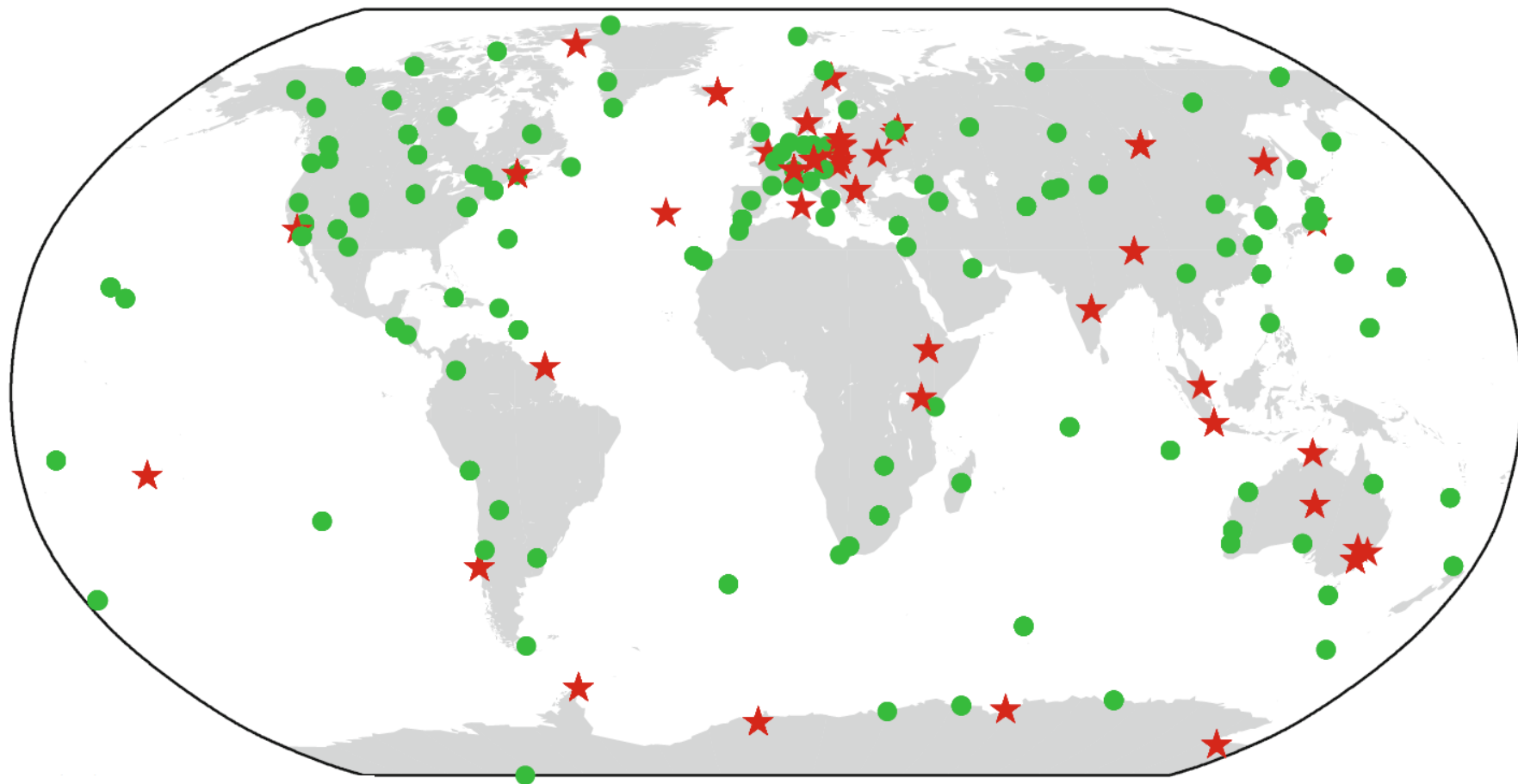
GNSS Konstellationen



Das **Raumsegment der GNSS** wird kontinuierlich ausgebaut (z.B. Galileo) und erneuert (z.B. GPS, GLONASS), so dass auch neue Frequenzen und Signale benutzt werden können. Das originale Design der GPS Konstellation (24 Satelliten auf 6 Bahnebenen) erlaubt die 3-dimensionale Positionierung auf der Erde und im erdnahen Raum dank mindestens 4 simultan sichtbaren Satelliten.

Entwicklung des multi-GNSS Stationsnetzes

Dach, R., E. Brockmann, S. Schaer, G. Beutler, M. Meindl, L. Prange, H. Bock, A. Jäggi, L. Ostini
(2009): GNSS processing at CODE: status report. Journal of Geodesy, 83(3-4), 353-366

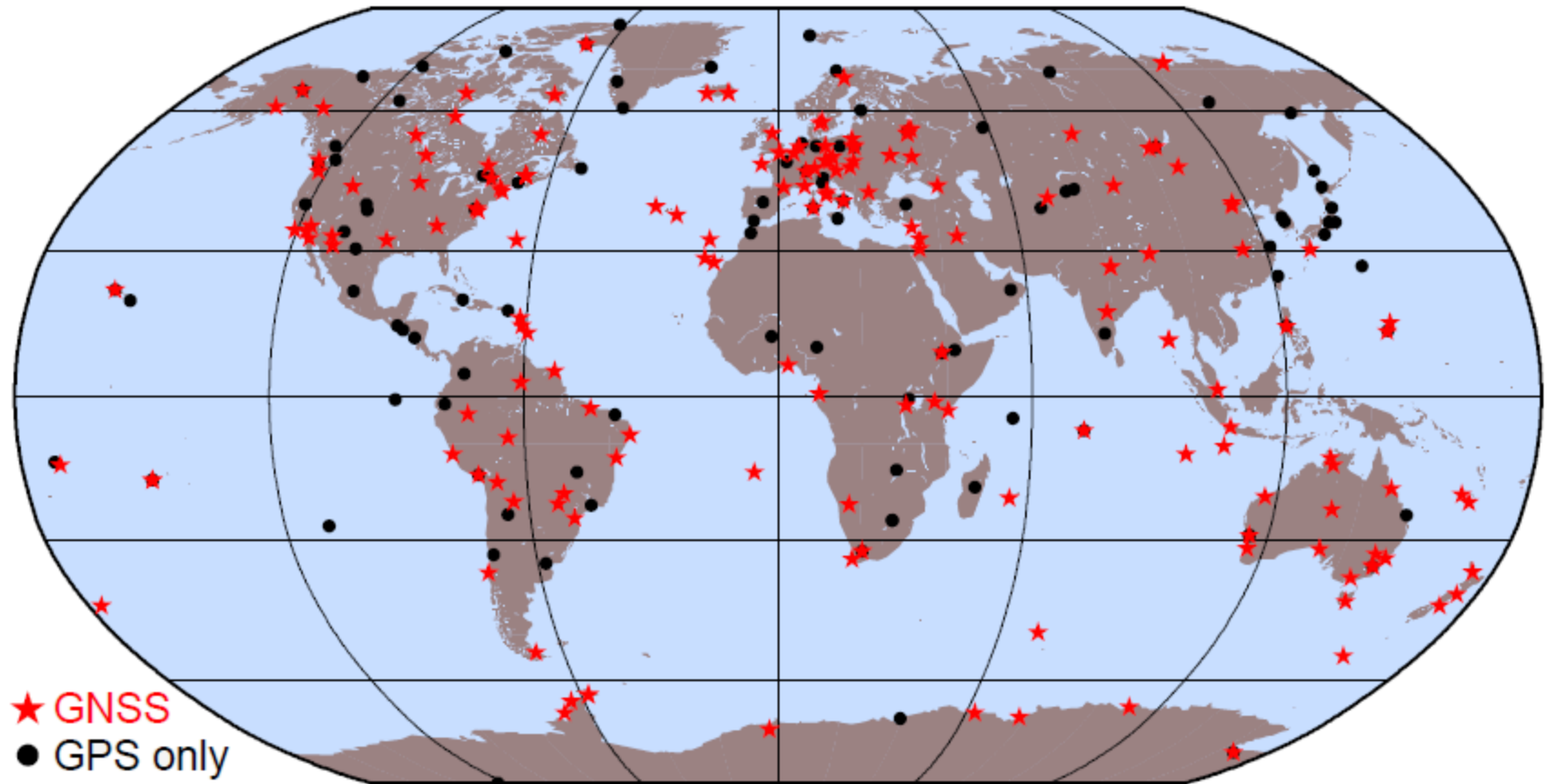


● GPS-only Empfänger

★ Kombinierte GPS-GLONASS Empfänger

IGS Stationen zur Berechnung der
CODE Final Orbits im Jahr 2009

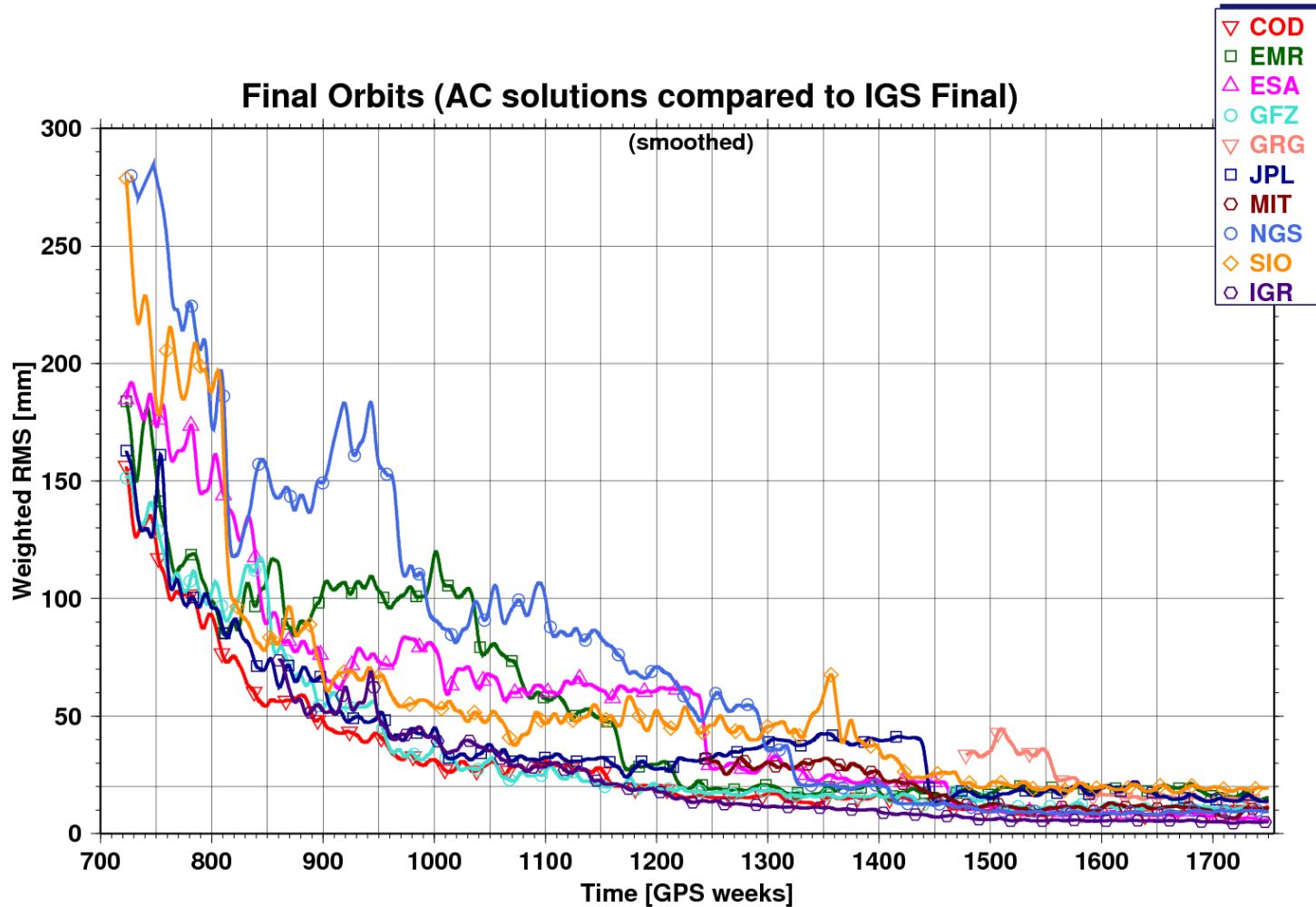
Entwicklung des multi-GNSS Stationsnetzes



Mehr und mehr multi-GNSS Empfänger sind
im globalen IGS Netz verfügbar

IGS Stationen zur Berechnung der
CODE Final Orbits Ende 2011

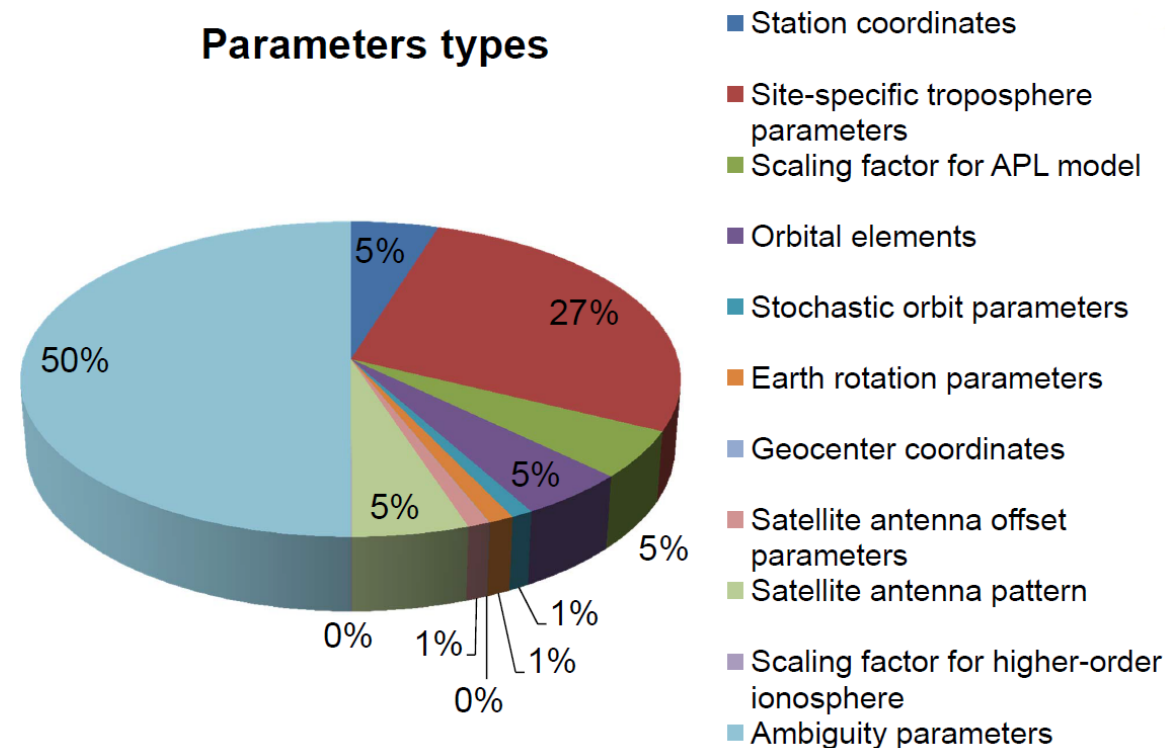
Entwicklung der GNSS (GPS) Bahnqualität



NOAA NGS, 3.08.2013 19:28 (GMT)

Die Konsistenz der Lösungen liegt im
Bereich weniger cm (s. <http://acc.igs.org>)

Simultane Bestimmung aller Parameter



Eine Vielzahl verschiedener Parameter muss auch bei GNSS **gemeinsam** mit den Bahnparametern bestimmt werden. Allerdings hat die simultane Bestimmung von Geometrie und Schwere hier noch nicht Einzug erhalten, obwohl die GNSS Satellitenbahnen genauso Lösungen einer Bewegungsgleichung sind und auch durchaus sensitiv auf die tiefen Terme des Erdschwerefeldes reagieren ...

Strahlungsdruckmodellierung

Empirisches Strahlungsdruckmodell:

$$\mathbf{a}_{\text{srp}} = \mathbf{a}_{\text{srp},0} + D(u) \mathbf{e}_D + Y(u) \mathbf{e}_Y + X(u) \mathbf{e}_X$$

mit

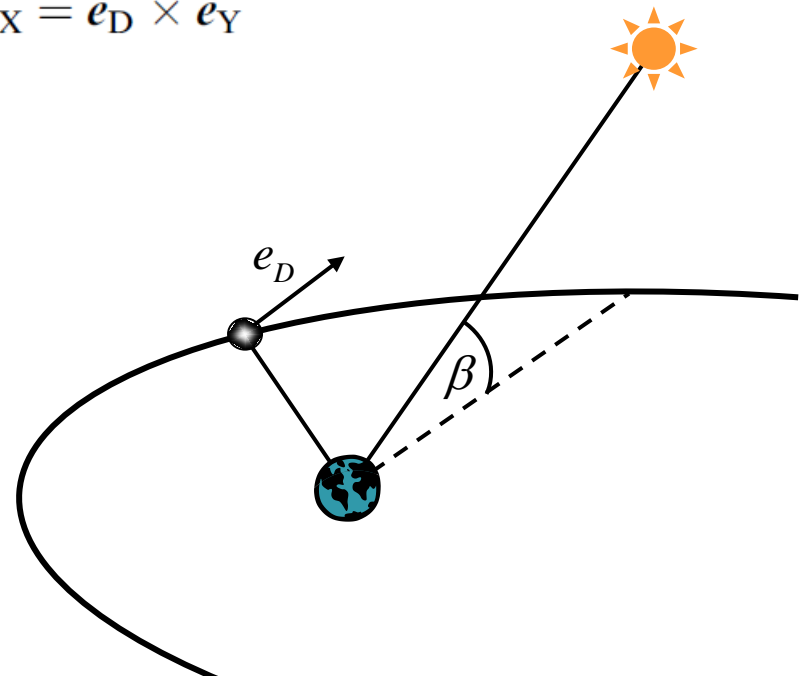
$$\mathbf{e}_D \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|} \quad \mathbf{e}_Y \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_D}{|\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_D|} \quad \mathbf{e}_X \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{e}_D \times \mathbf{e}_Y$$

und

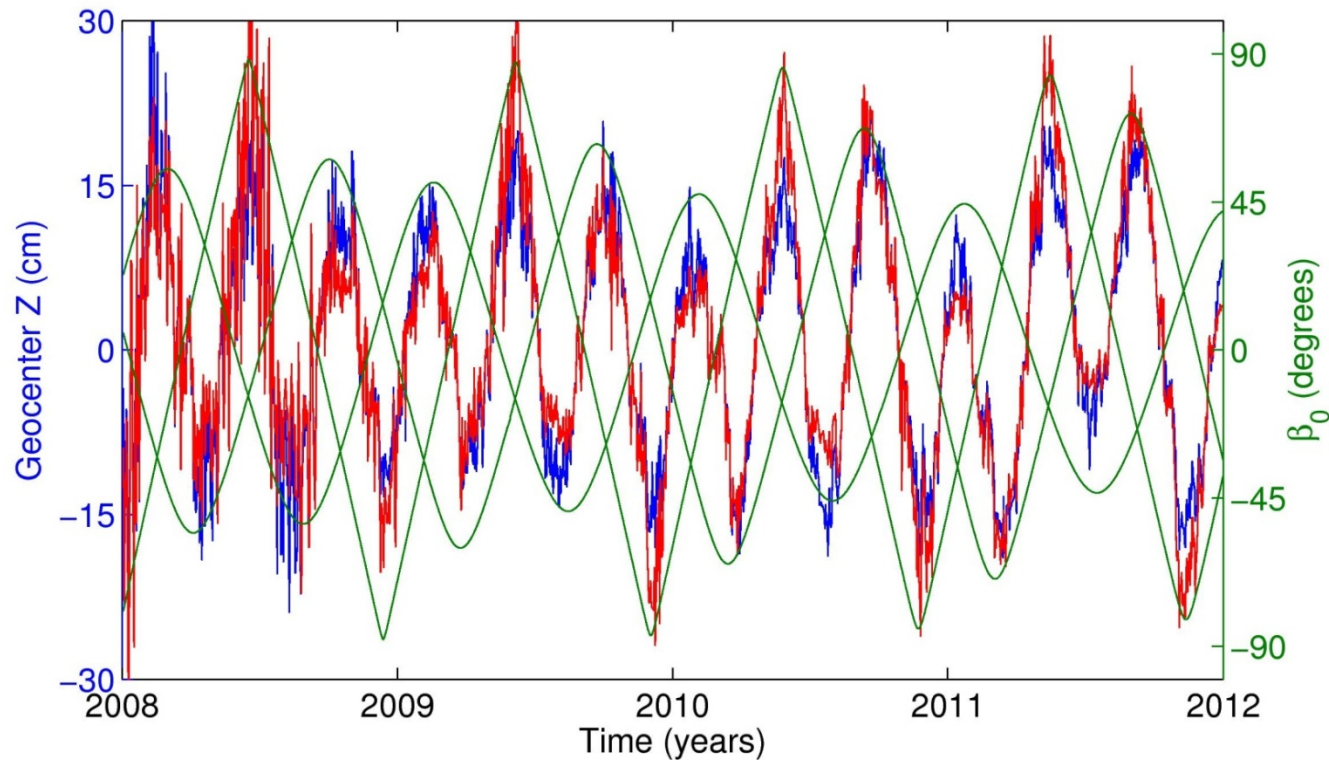
$$D(u) = D_0 + D_c \cos u + D_s \sin u$$

$$Y(u) = Y_0 + Y_c \cos u + Y_s \sin u$$

$$X(u) = X_0 + X_c \cos u + X_s \sin u$$



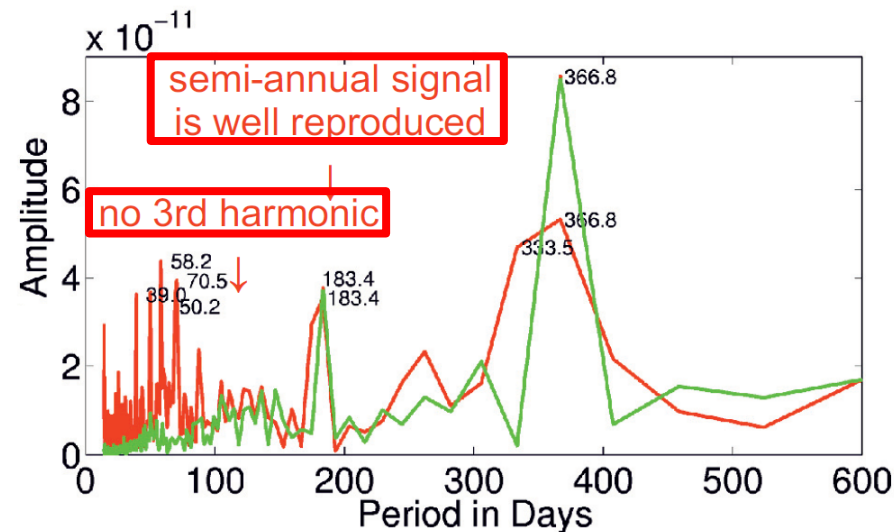
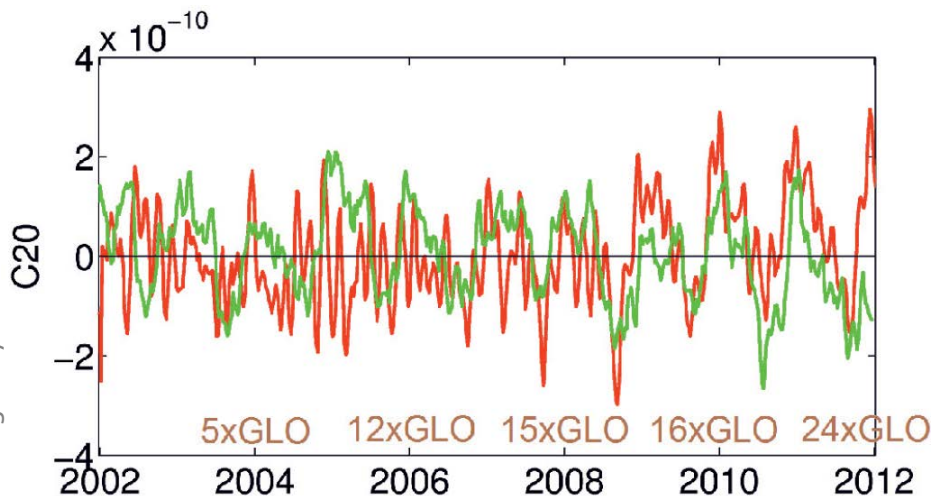
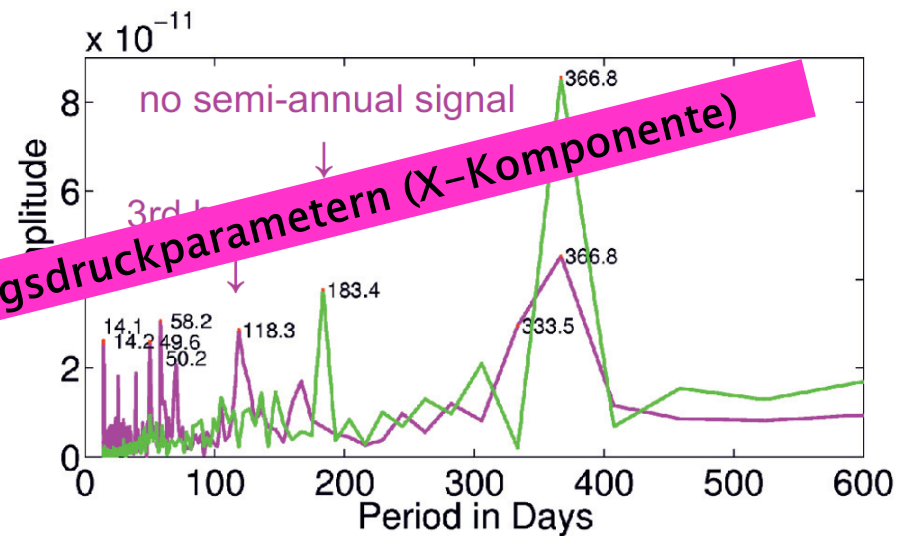
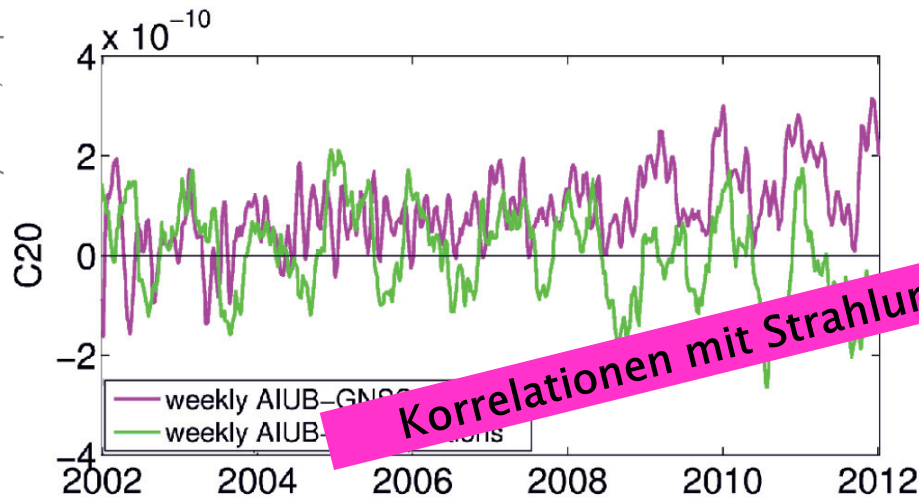
Geozentrumskoordinaten



Z-Koordinate des Geozentrums aus GPS bzw. GLONASS Daten geschätzt (blau). Zu einem grossen Teil können die Variationen mit Korrelationen der Strahlungsdruckparameter erklärt und rekonstruiert werden (rot).

Zeitvariabilität aus multi-GNSS Lösungen

Sošnica, K., A. Jäggi, G. Beutler, U. Meyer, R. Dach, L. Mervart (2013): Time variable Earth's gravity field from SLR and GNSS satellites. IAG Scientific Assembly 2013, Sept 01-06

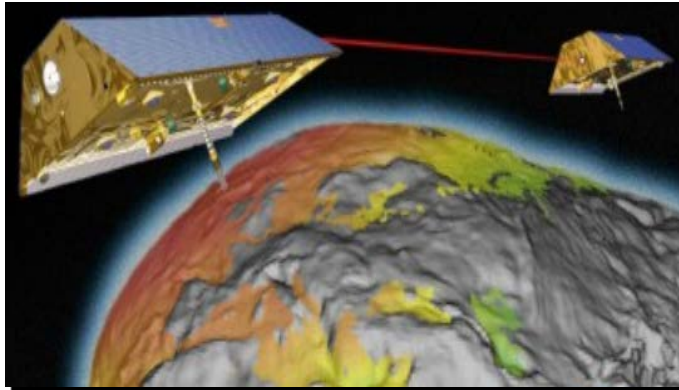


Aktuelle Schwerfeldmissionen



CHAMP (2000-2010)

CHallenging
MInisatellit
Payload



GRACE (2002-201?)

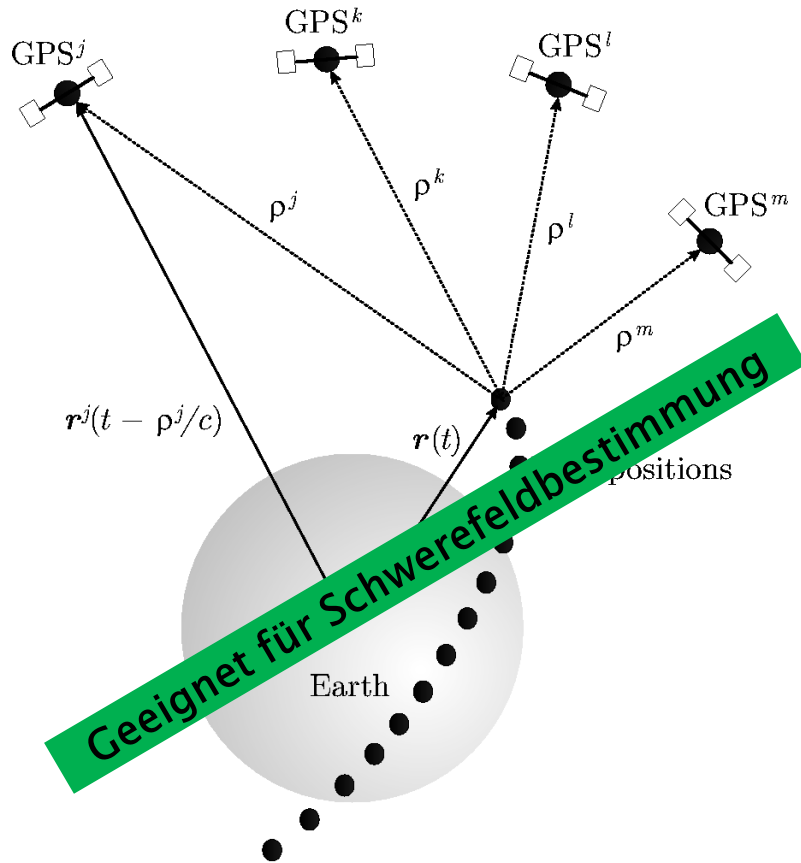
Gravity
Recovery
And
Climate
Experiment



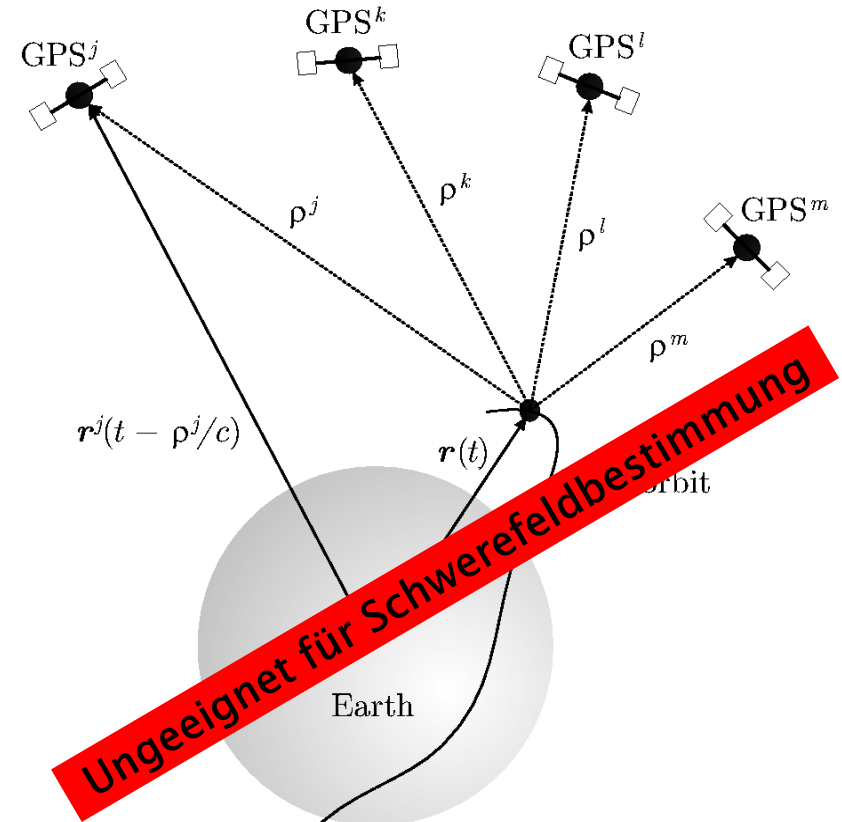
GOCE (2009-2013)

Gravity Field & Steady-state
Ocean
Circulation
Explorer

Kinematische vs. dynamische Bahnen



Kinematische Bahnen liefern nicht die höchste Bahngenauigkeit, können aber **unabhängig** von Kräftenmodellen bestimmt werden

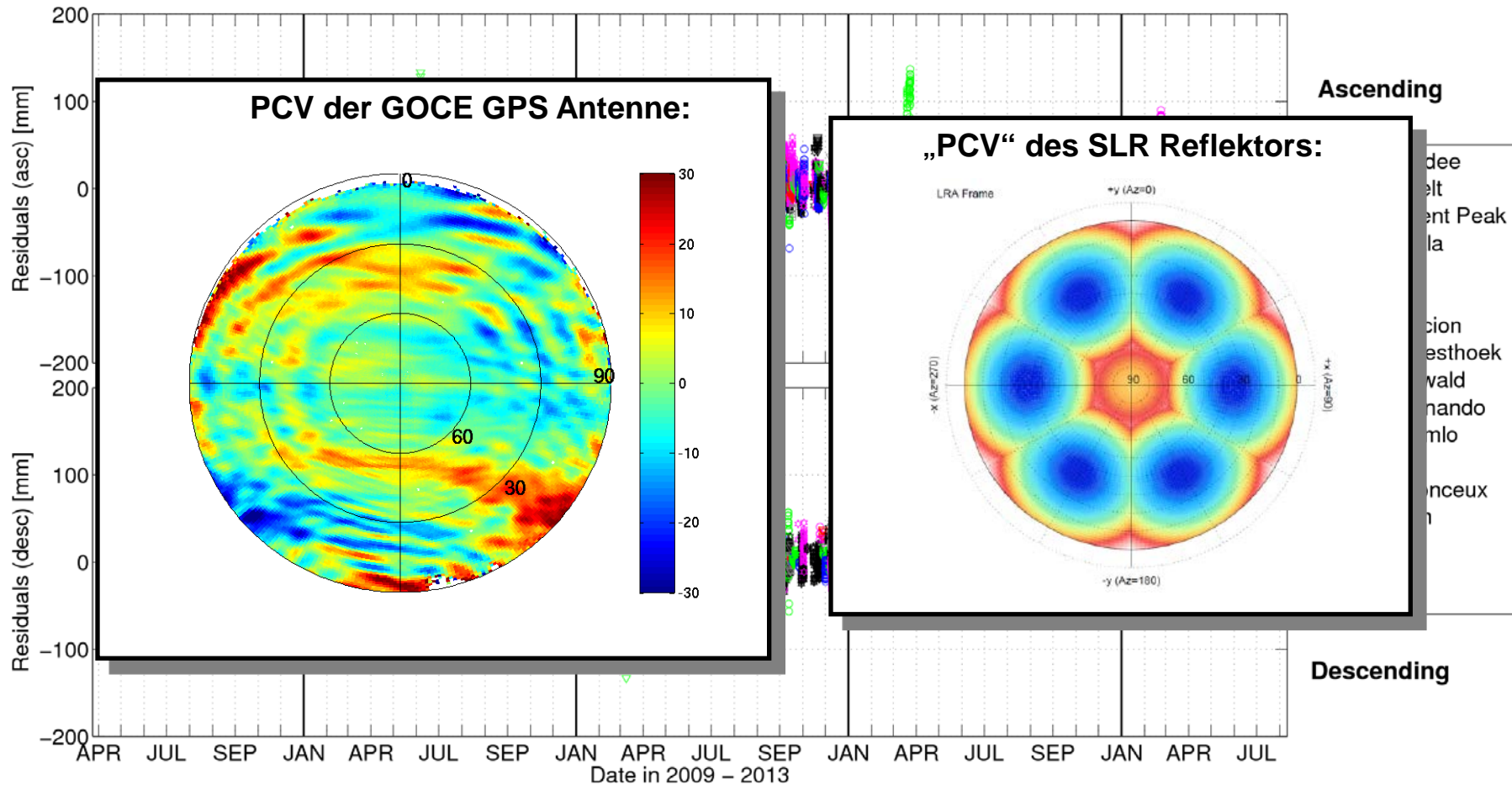


Reduziert-dynamische Bahnen liefern eine Bewegungsgleichung, in der die Bahnhöhe, das Sternmodell **abhängig** von, das Sternmodell ist eine gute dynamische Modellierung

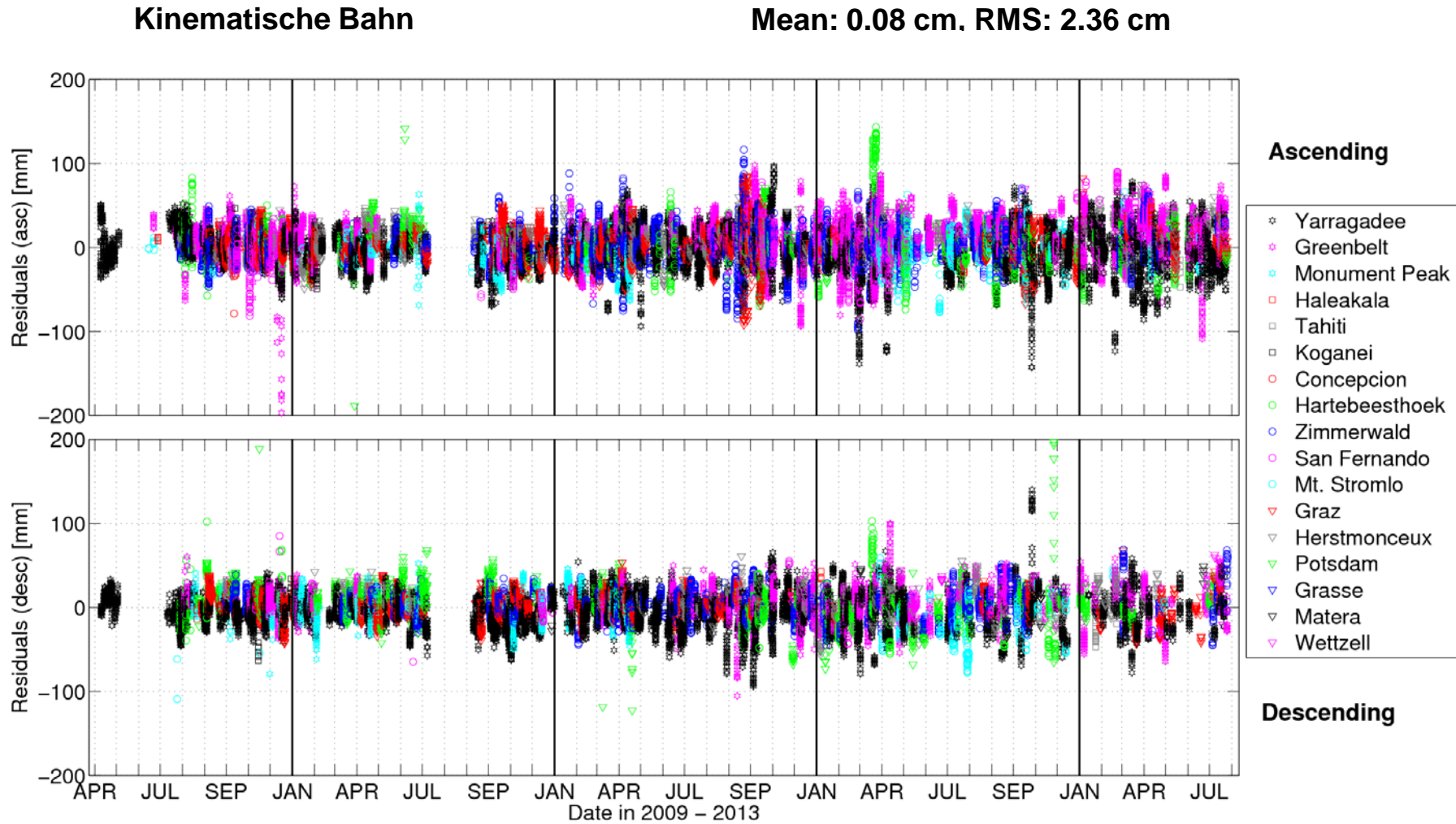
Bahngenauigkeit von GOCE

Reduziert-dynamische Bahn

Mean: 0.15 cm, RMS: 1.79 cm

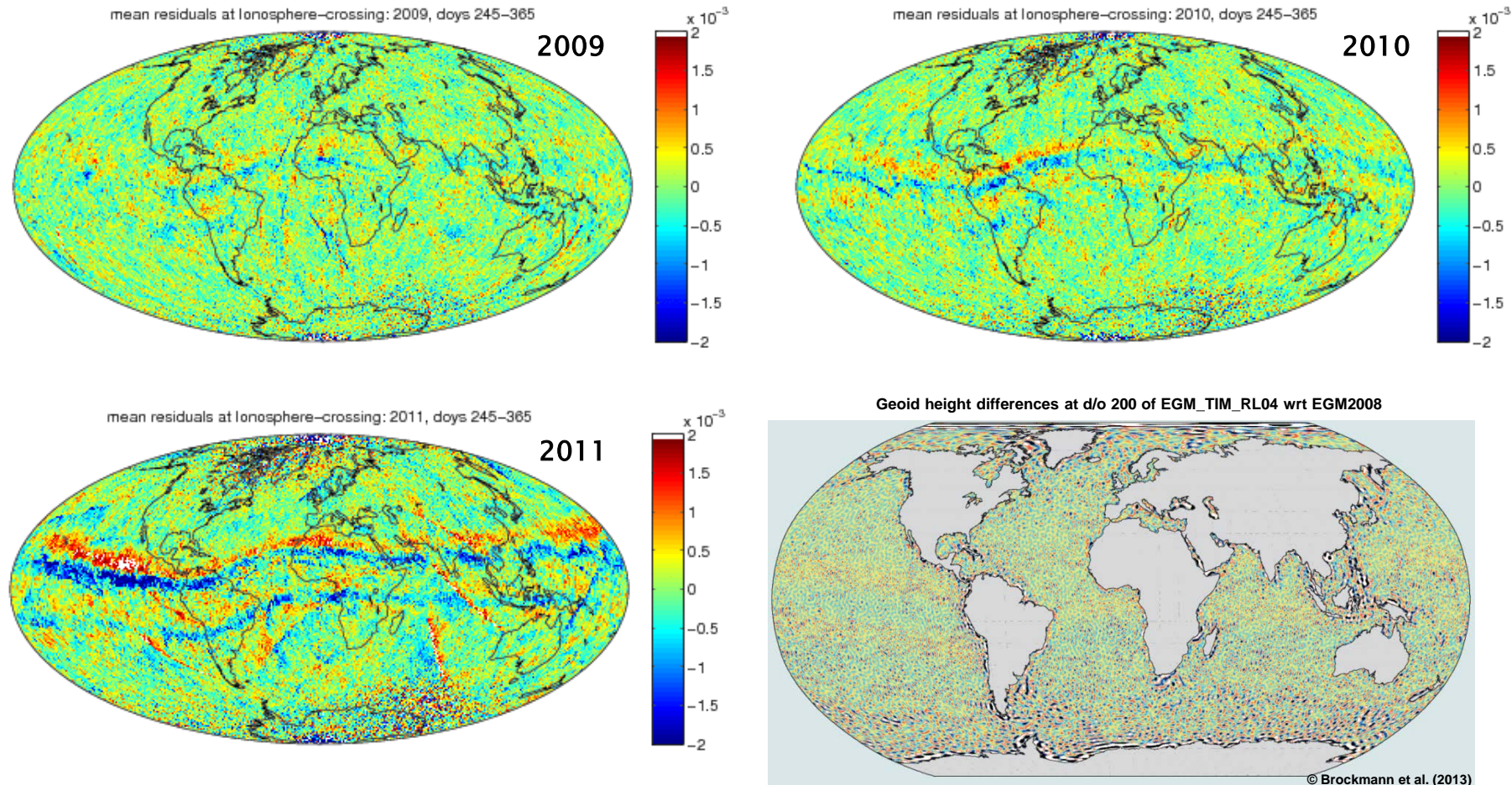


Bahngenauigkeit von GOCE



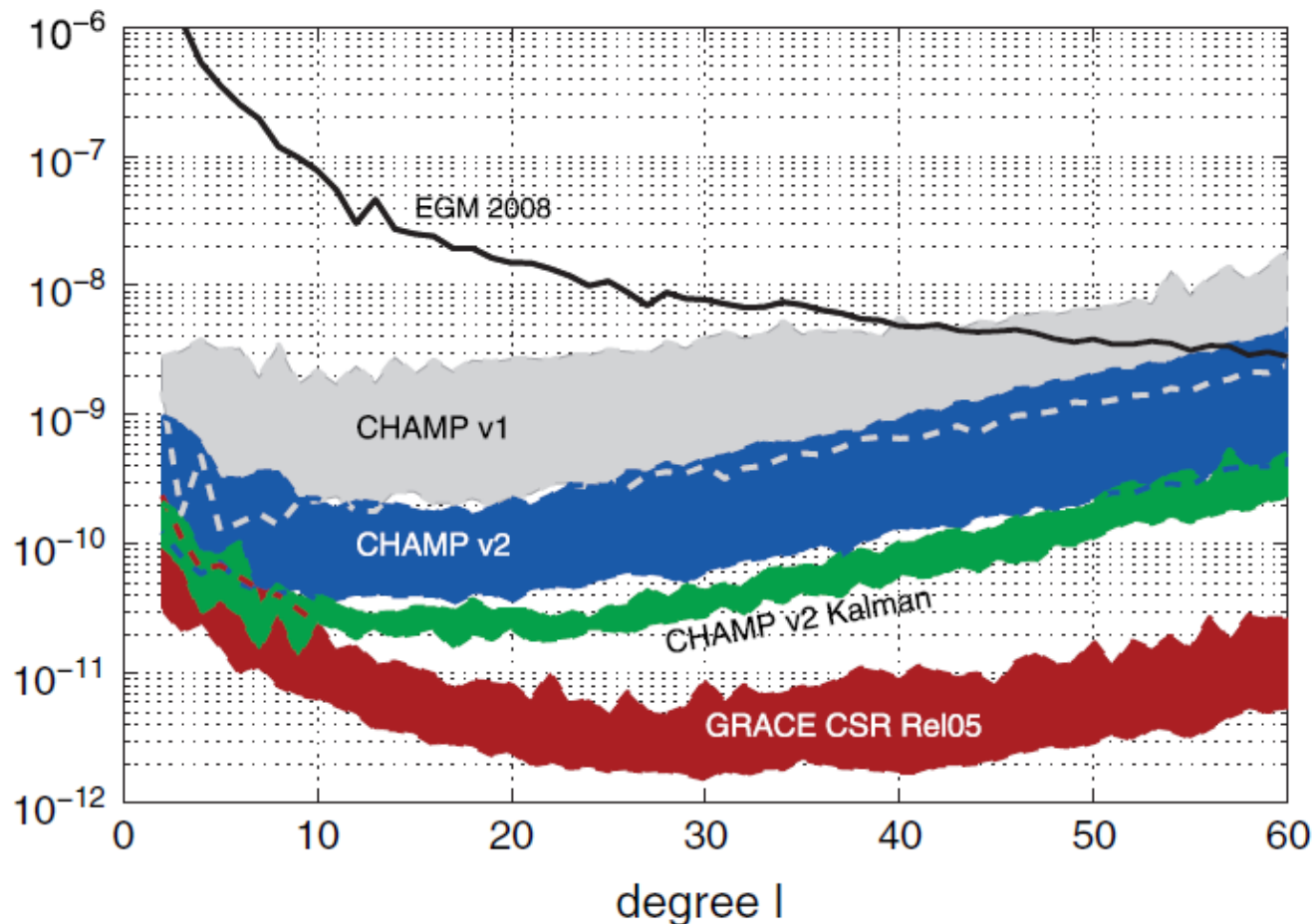
Artefakte der Bahnbestimmung im Schwerefeld

Bock, H., A. Jäggi, U. Meyer, G. Beutler, J. van den IJssel (2013): GPS-only gravity field determination from GOCE data. IAG Scientific Assembly 2013, Sept 01–06



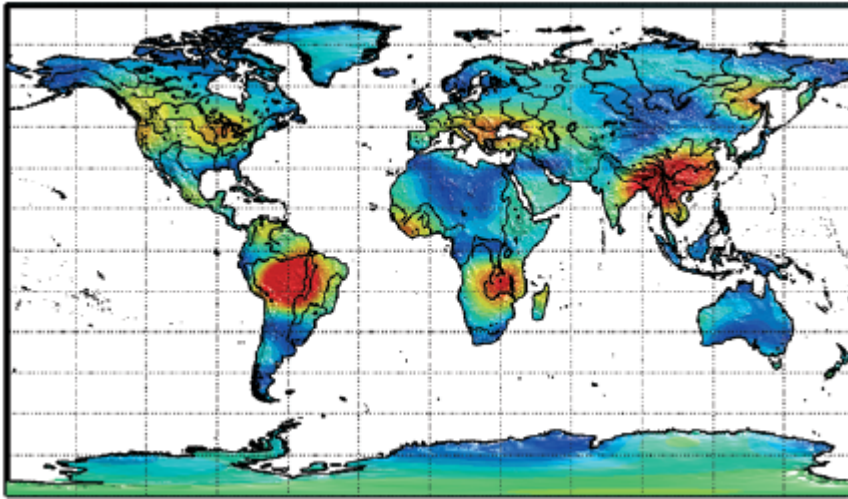
Die Geoiddifferenzen zu ITG-GRACE2010 (rechts unten, Farbskala $\pm 5\text{cm}$) zeigen, dass sich kleine systematische Fehler in der Bahnbestimmung problemlos bis in die Schwerefeldlösungen fortpflanzen können.

Zeitvariabilität aus GPS – CHAMP

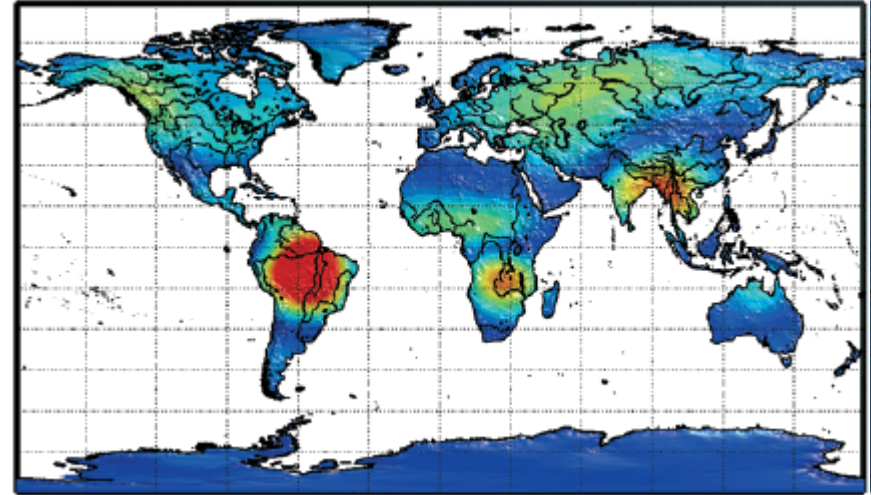


CHAMP GPS und GRACE K-Band Lösungen „spielen“ grundsätzlich in einer anderen Liga. Dank einer **rigorosen Reprozessierung** der CHAMP GPS Daten gibt es im langwelligen Bereich nun aber Berührungspunkte.

Zeitvariabilität aus GPS – CHAMP



CHAMP GPS

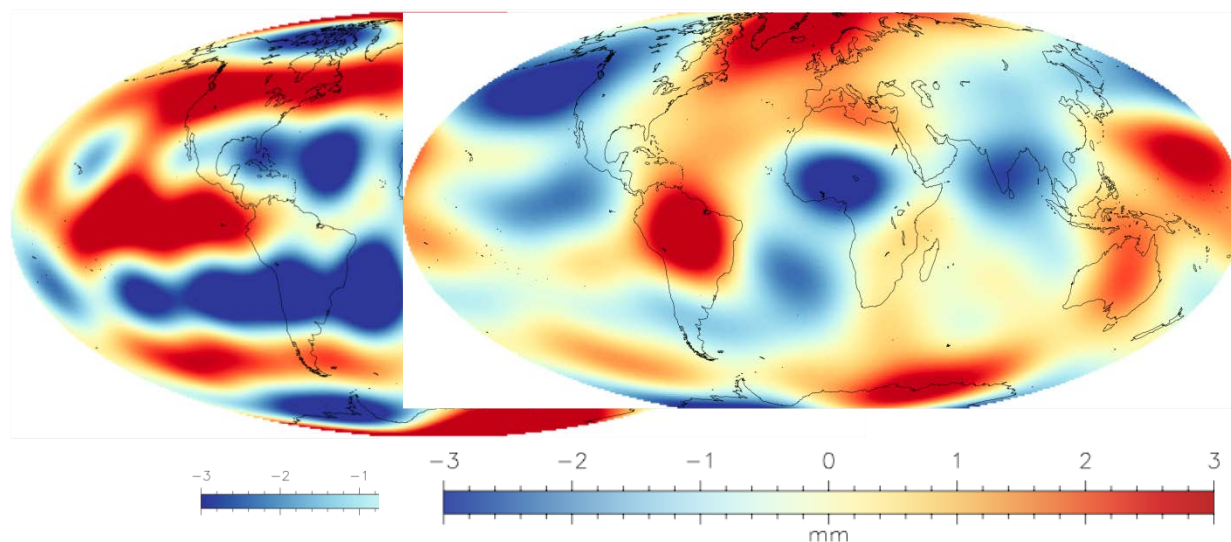


GRACE K-Band

Mittels spezieller Behandlung (**Kalman-Filter**) lässt sich das jährliche Signal zumindest im langwelligen Bereich einigermaßen gut erfassen. Dies ist ein erster, vielversprechender Schritt zur Ausreizung künftiger Gap-Filler Missionen, z.B. Swarm.

Zeitvariabilität aus GPS – GOCE

Freie Lösung Fit eines jährlichen Signals

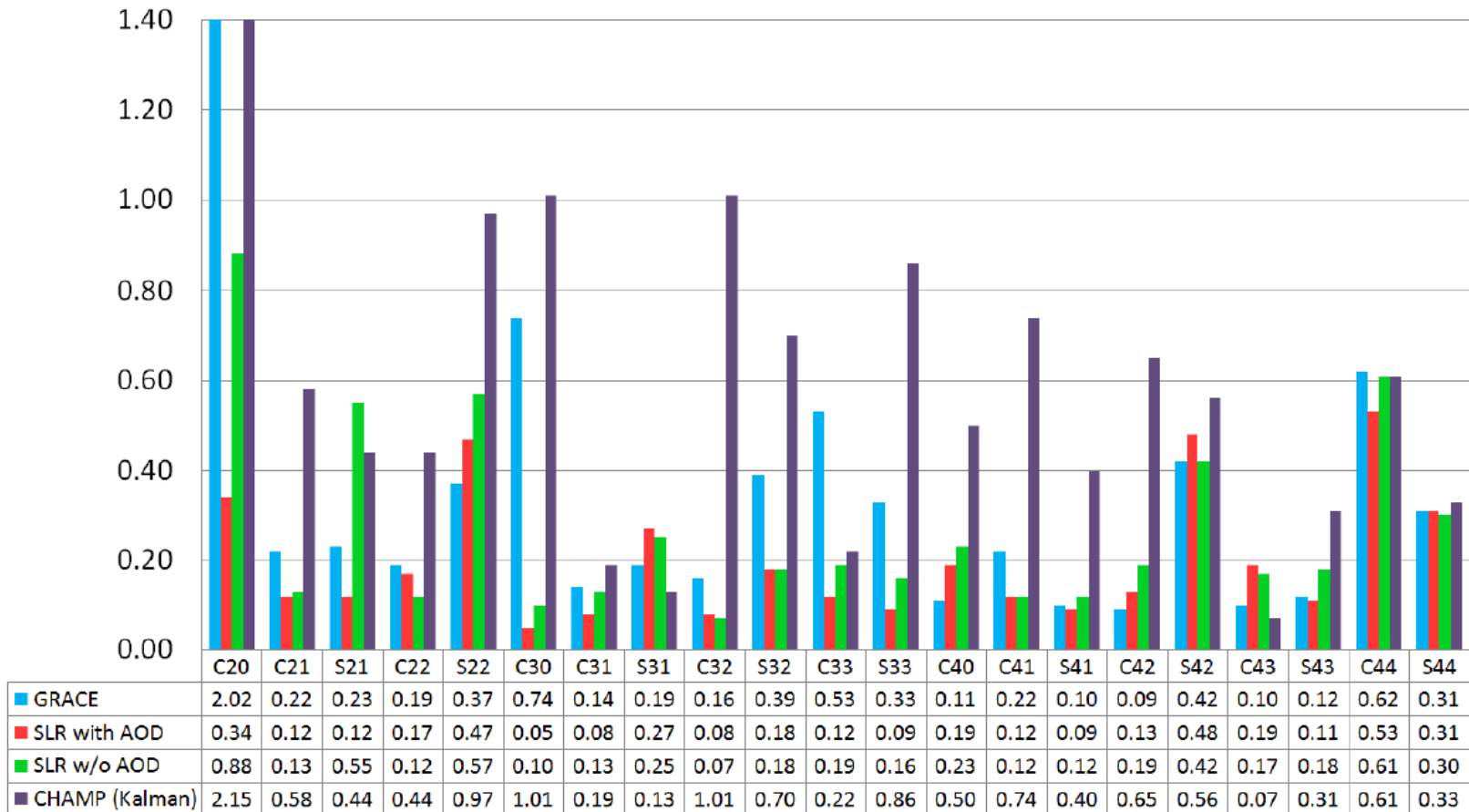


© Visser et al. (2013)

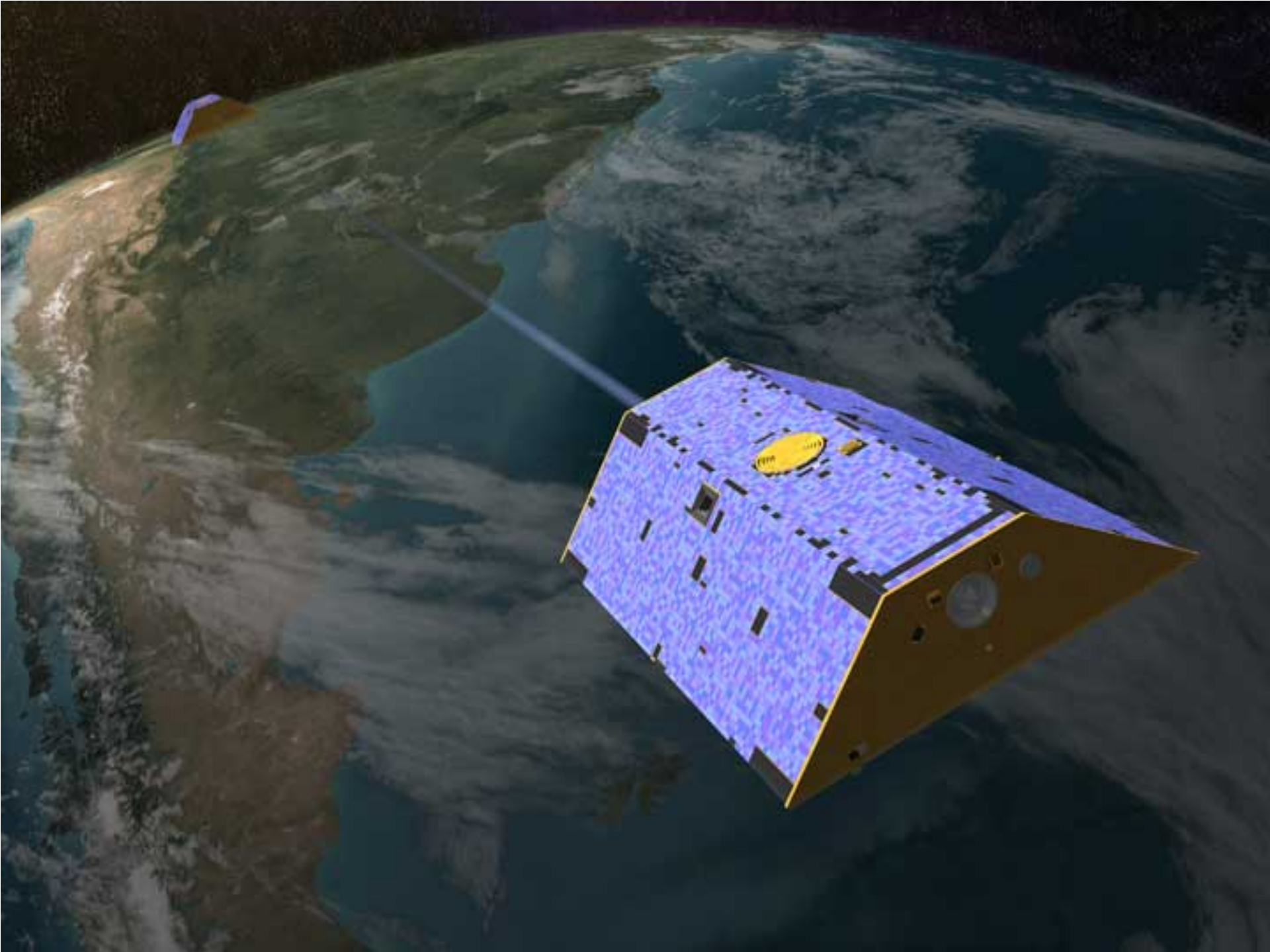
Ohne spezielle Behandlung (**Kalman-Filter, einfacher Fit**) lassen sich die jährlichen Signale leider kaum erkennen. Die tiefe Bahnhöhe von GOCE bietet gegenüber CHAMP kaum einen Vorteil für die Bestimmung der langwelligen Strukturen des Erdschwerefeldes aus den GPS Messungen.

Zeitvariabilität aus verschiedenen Techniken

Amplitudes of annual signals of low gravity field coefficients (x1e-10)



Die Bestimmung der Zeitvariabilität aus GPS hl-SST bietet sicherlich noch Potential für Verbesserungen. Man darf auf Swarm gespannt sein.



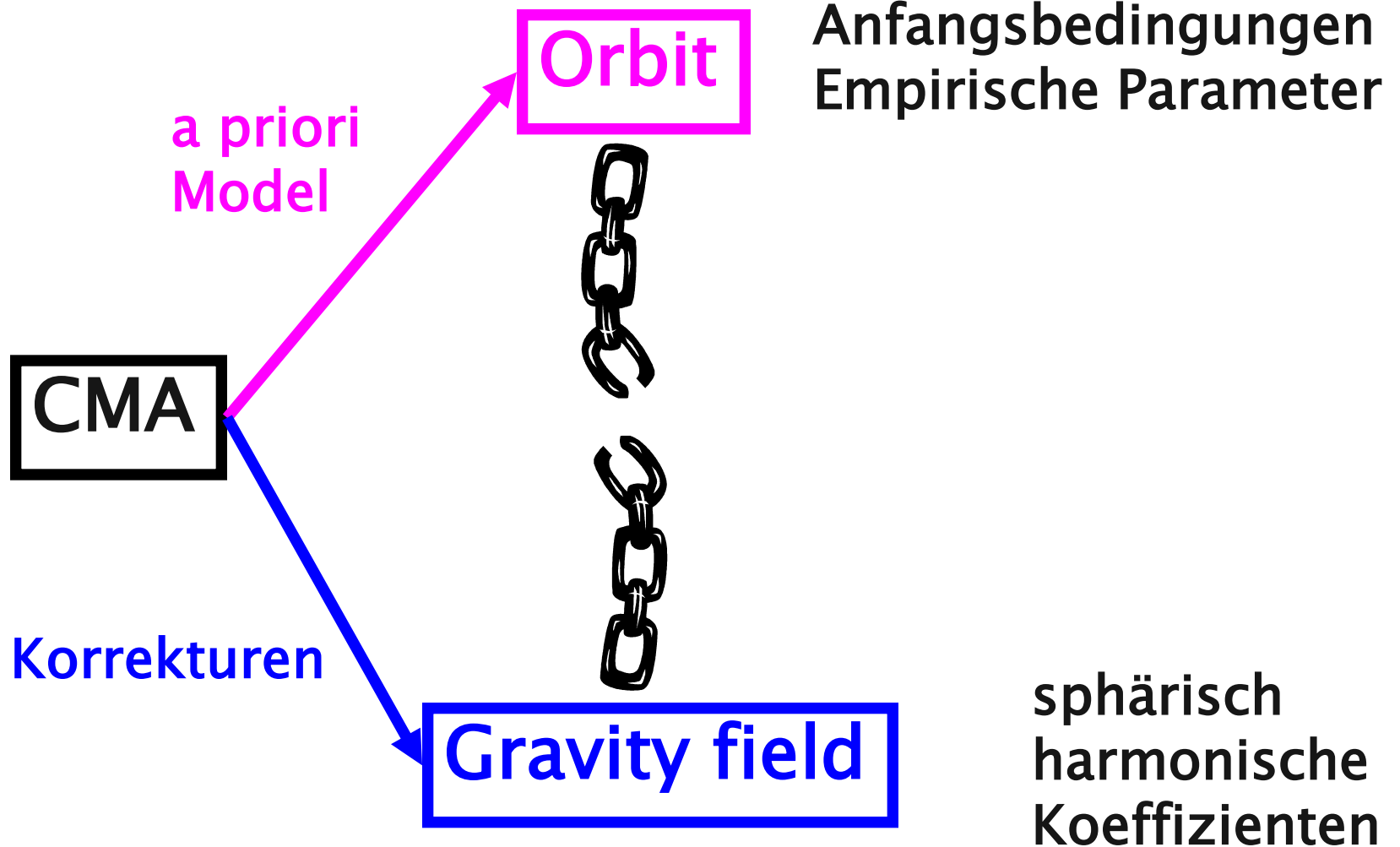
Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?



Nicht-lineares Parameterbestimmungsproblem

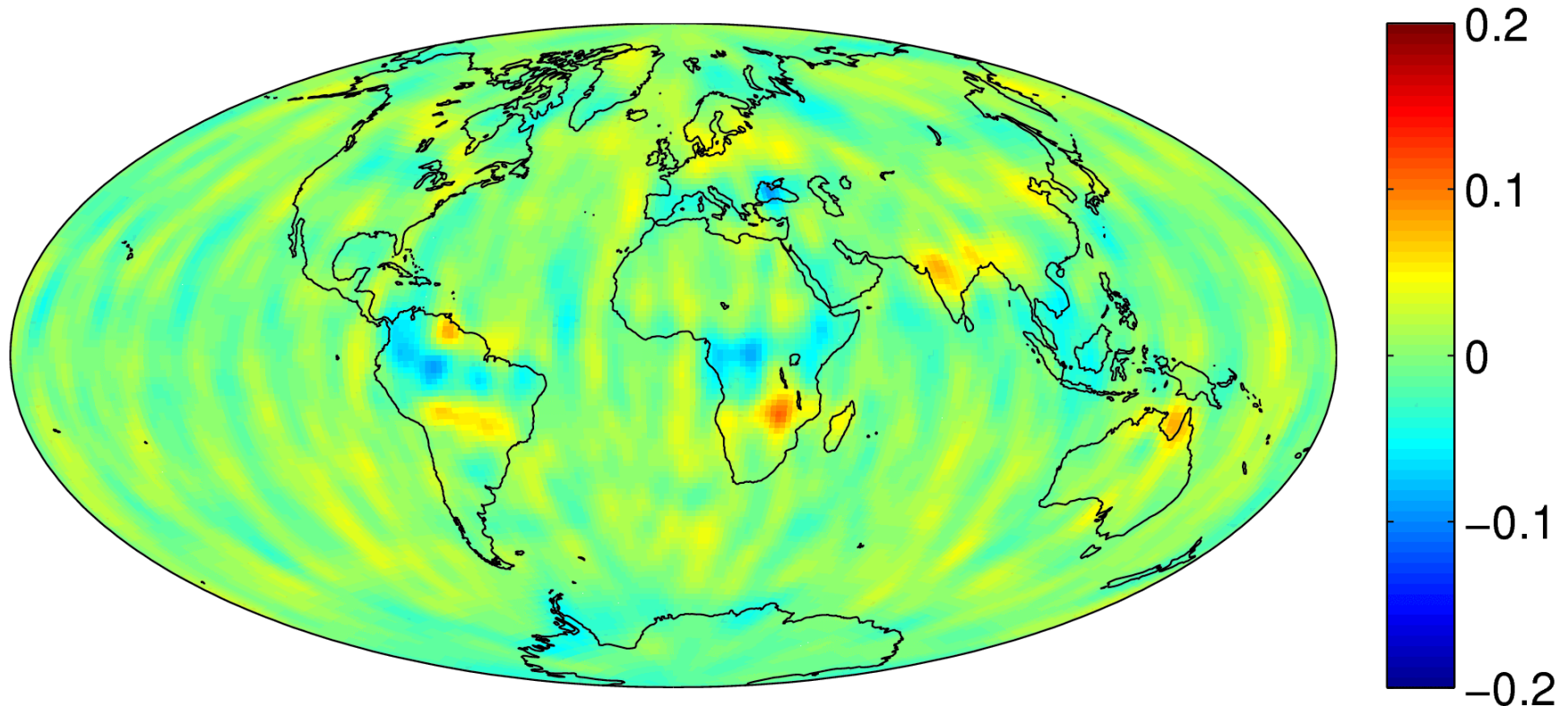
- A priori Modell (Linearisierung)
- Beobachtungen
- Regularisierung (a priori Wissen mittels Pseudo-Beobachtungen)

Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?



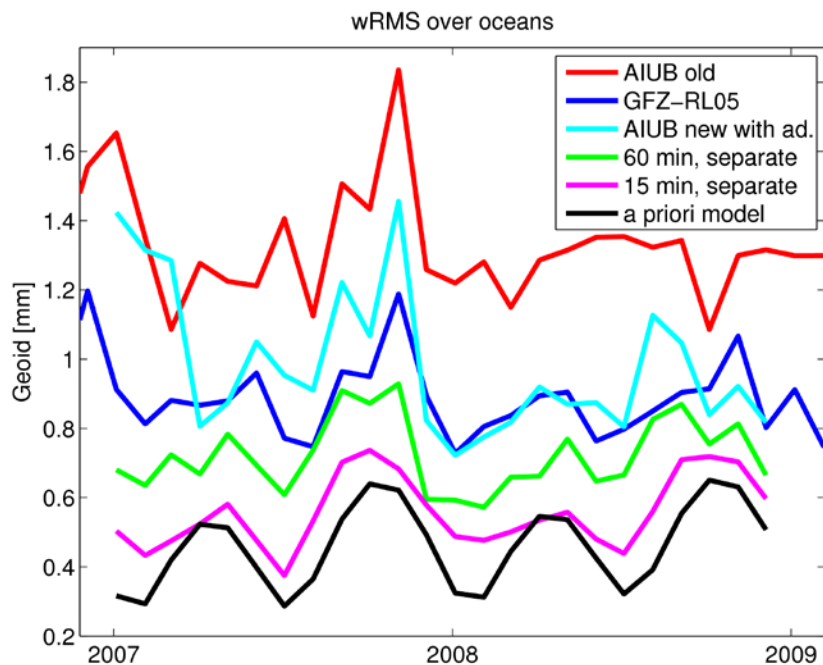
Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

Separate solution, 15 min



Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

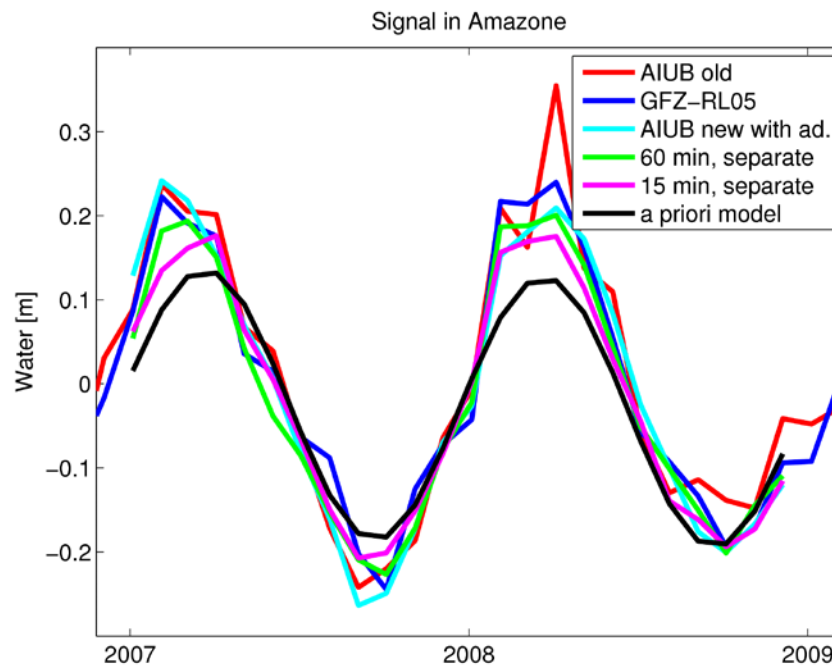
Meyer, U., A. Jäggi, H. Bock, G. Beutler (2013): The role of a priori information in gravity field determination. EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, April 7–12, 2013



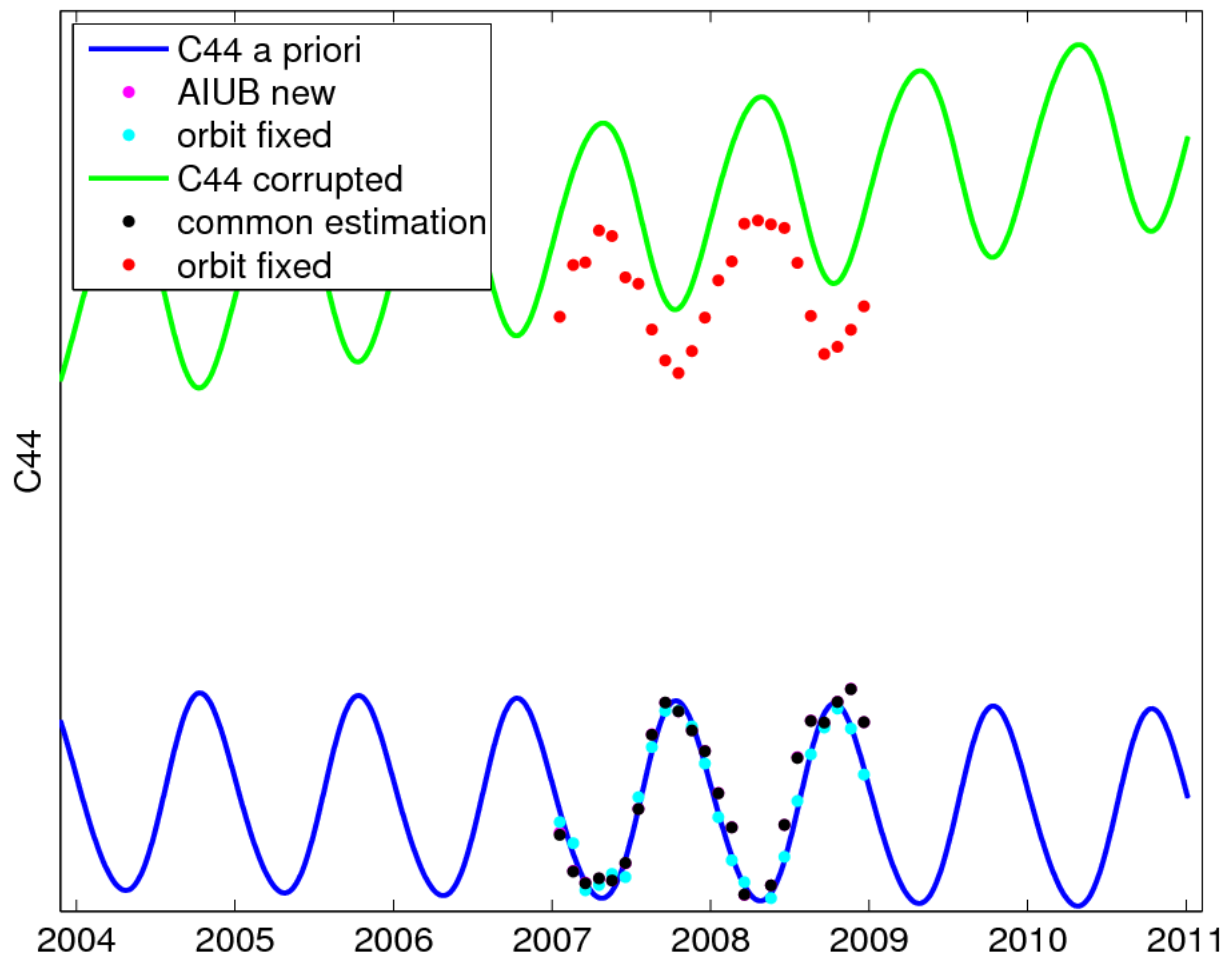
Signal

Rauschen

Signaldämpfung ?



Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?



Zusammenfassung

- Bahnbestimmung ist auch im Zeitalter der Space Geodesy eine **unverzichtbare** Technik. Ohne Bahnbestimmung könnten zusätzliche Messungen oft gar nicht ausgewertet werden.
- In vielen Fällen kann (darf) die Bahnbestimmung **nicht** von der Bestimmung der geophysikalisch relevanten Parameter entkoppelt werden. Ganzheitliche Ansätze sollten wenn immer möglich zum Einsatz kommen.
- **Systematische Fehler** in der Bahnbestimmung wirken sich oft störend auf die geophysikalisch relevanten Parameter aus und müssen minimiert werden.
- Sämtliche Satellitenbahnen (**GNSS, SLR, LEO**) haben das Potential zu einer Vielzahl geophysikalisch relevanter Parametern beizutragen, z.B. zu den tiefen Termen des Erdschwerefelds.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

